

Avaliação da variabilidade das características do solo numa pastagem permanente integrada num projecto de Agricultura de Precisão

João M. P. R. Serrano¹⁾, José M. N. O. Peça¹⁾, José R. M. Silva¹⁾, Sousa, Adélia,¹⁾ Paulo Palma¹⁾, Shakib Shaidian¹⁾, Mário Carvalho¹⁾

¹⁾Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas (ICAAM), Departamento Engenharia Rural, Universidade de Évora, 7000 Évora, PORTUGAL; jmrs@uevora.pt

Resumo

O levantamento da variabilidade do solo e da vegetação numa pastagem permanente é a base para a gestão diferenciada da fertilização, a qual é o principal instrumento utilizado pelos agricultores na melhoria das pastagens permanentes no Alentejo. O processo tradicional de amostragem e avaliação das características do solo é muito exigente em termos de tempo, de reagentes necessários nas análises e de trabalho manual, o que pode comprometer um projecto de agricultura de precisão. Este artigo descreve as principais etapas seguidas pelos autores para simplificar a metodologia de avaliação do solo em pastagens permanentes, baseada na utilização de uma sonda de condutividade eléctrica num projecto de agricultura de precisão. Os ensaios decorreram numa parcela de cerca de 6 hectares, a qual foi subdividida em quadrículas de 28m por 28m. As amostras de solo e a avaliação da condutividade eléctrica foram georeferenciadas com o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Os dados geoespaciais foram tratados pelo *software* ArcGIS 9.3 e foi utilizada a análise de regressão ponderada geograficamente (Geographically Weighted Regression) obtendo-se valores de coeficientes de determinação interessantes entre o pH e a condutividade eléctrica e ainda entre esta última e a produtividade da pastagem, em termos de matéria seca.

Palavras Chave: agricultura de precisão, análises de solo, distribuição variável de adubo, condutividade eléctrica.

Abstract

The assessment of the variability of soil and vegetation in a permanent pasture are the basis for the management of variable rate fertilization, which is the main instrument used by farmers for improvements in permanent pasture in Alentejo, Portugal. The traditional process of sampling and evaluation of the soil is very demanding in terms of time, manual work and reagents, and can derail a project of precision agriculture. This paper describes the major steps followed by the authors to simplify the methodology of soil evaluation in a permanent pasture based in the utilisation of the apparent electric conductivity in a precision agriculture project. Tests took a parcel of approximately 6 hectares, which was subdivided into squares of 28m by 28m. The soil samples and evaluation of apparent electrical conductivity were georeferenced with a Global Positioning System (GPS). The geospatial data were processed by ARCGIS 9.3 software and the Geographically Weighted

Regression analysis, resulting in interesting R^2 values between pH and apparent electrical conductivity and also between the latter and dry mass pasture productivity.

Keywords: precision agriculture; soil analyses, variable fertilizer spreading; electric conductivity.

1. Introdução

O solo é um factor chave para a produtividade da pastagem, para além do clima e da topografia. Até há uma dezena de anos atrás, a gestão da fertilização das culturas era baseada em valores médios, considerando o solo homogéneo. A disponibilidade de novas ferramentas tecnológicas, nomeadamente o acesso a sistemas de geo-referenciação espacial como o sistema de posicionamento global (GPS), permite hoje ter conhecimento preciso da variabilidade de parâmetros do solo e das culturas. Estas novas ferramentas lançaram um novo desafio, conhecido como agricultura de precisão, conceito que visa a gestão adequada dos recursos, o que, em termos de aplicação de fertilizantes, significa a aplicação diferenciada em função das características do solo e das culturas, com benefícios a nível económico e ambiental.

A medição de parâmetros físicos do solo (e em particular do sub-solo) mostra que podem existir variações significativas numa mesma parcela de pastagem. A avaliação da variabilidade do solo e da vegetação numa pastagem permanente constituem a base para a gestão diferenciada da fertilização, sendo este o principal instrumento de melhoria utilizado pelos agricultores em pastagens permanentes no Alentejo.

O processo tradicional de amostragem e avaliação do solo baseia-se na utilização de métodos destrutivos, que envolvem a recolha física de amostras de solo em posições geo-referenciadas e a sua análise em laboratório. Este é um processo muito exigente em termos de tempo, mão-de-obra e reagentes, podendo comprometer a viabilidade de um projecto de agricultura de precisão.

Com o desenvolvimento de sensores para monitorização do solo, a recolha de dados pode ser realizada sem perturbação do solo e com maior resolução espacial do que nos métodos manuais ou de laboratório. Os sensores do solo mais utilizados na pastagem são sensores de indução electromagnética. Sensores de indução magnética são usados há praticamente um século, em conjunto com outros métodos geofísicos para exploração mineral. No passado esta tecnologia foi utilizada com diferentes fins (investigar localização de águas subterrâneas, localizar bandas de argila e outros depósitos, etc.). Mais recentemente começaram a ser utilizados na agricultura para monitorizar a salinidade e identificar solos afectados pelo sódio. O interesse nesta tecnologia cresceu em resposta à alta resolução espacial possível com a utilização do GPS, sendo utilizados para determinar a variabilidade

especial das propriedades do solo (Proffitt *et al.*, 2006). Dafonte (2004) confirmou que o desenvolvimento de sensores para medição da condutividade eléctrica se encontra muito ligado com a implementação do conceito de agricultura de precisão e com a utilização do GPS na agricultura.

Uma vez que o solo não é uniforme, utiliza-se o termo condutividade eléctrica aparente, que é a condutividade eléctrica de um solo uniforme que dê a mesma leitura (Dafonte, 2004). Este parâmetro exprime-se em $S\ m^{-1}$ e é o quociente entre o produto da condutância (em Siemens) pela distância e a área. A uma dada estrutura de solo corresponde um único valor de condutividade eléctrica, mas o inverso não é verdade, o que dificulta a interpretação dos dados geofísicos obtidos. Segundo Netto *et al.* (2007) a condutividade eléctrica expressa a concentração de sais solúveis no solo. Uma vez que a condutividade eléctrica aparente do solo é uma função de algumas propriedades deste, encontrando-se correlacionada, nomeadamente, com variações na textura e nos teores de água no solo, com o pH, com a espessura do solo, com a capacidade de troca catiónica e com a mineralogia das argilas, pode usar-se como medida indirecta dessas características se as contribuições de outras propriedades do solo que afectam a condutividade eléctrica forem conhecidas ou puderem ser estimadas (Dafonte, 2004; Couto *et al.*, 2005; Inamassu *et al.*, 2007). Netto *et al.* (2007) verificaram correlações significativas entre o pH e a concentração de sódio de troca no solo, tendo confirmado, por sua vez, uma correlação positiva significativa entre a condutividade eléctrica e a concentração de sais no solo. Klar (1988) encontrou respostas diferenciadas das culturas em função da concentração de sais no solo, assumindo que estas concentrações podem ser quantificadas a partir dos valores da condutividade eléctrica. Inamassu *et al.* (2007) confirmaram que os mapas de condutividade eléctrica do solo com resolução da ordem de 1 m, apesar de não excluírem a análise de amostras em laboratório, fornecem uma orientação para a recolha de amostras estratégicas através da identificação de zonas homogéneas.

O objectivo deste trabalho consistiu em correlacionar os dados das características físicas e químicas do solo e da produtividade da pastagem obtidos em 4 anos de análises de amostras recolhidas numa mesma parcela de pastagem, com os dados da condutividade eléctrica. Desta forma, procura-se simplificar o procedimento de amostragem e disponibilizar ao gestor da pastagem, uma ferramenta que permita identificar de forma expedita a variabilidade do solo e sustentar objectivamente a tomada de decisão quanto à gestão diferenciada da pastagem, especialmente no que se refere à aplicação de fertilizantes.

2. Material e métodos

Entre os anos de 2004 e 2007, no âmbito de um projecto financiado pelo governo português através do programa “AGRO”, foi seleccionada uma parcela de pastagem com cerca de 6 ha de área, localizada 40 km a Nordeste de Évora. A parcela foi subdividida numa grelha com 76 quadrículas com 28m de lado. Em Maio de cada ano, no final do ciclo vegetativo da cultura, procedeu-se à recolha de amostras compósitas de solo, georreferenciadas com um GPS RTK (figura 1), correspondendo a cada amostra compósita 5 recolhas com sonda meia cana, realizadas aleatoriamente em cada quadrícula, até 20 cm de profundidade. Estas amostras foram submetidas a análise nos Laboratórios de Física e de Química de Solos da Universidade de Évora, com a obtenção dos seguintes parâmetros: teores de argila, limo, areia, matéria orgânica, fósforo, azoto, potássio e, ainda o pH.

Ao longo do ciclo vegetativo da pastagem, normalmente depois da dormência vegetativa de Inverno, foram recolhidas amostras de pastagem nas 76 quadrículas. Cada amostra foi obtida através do corte directo da pastagem com tesoura, numa área de 1m², delimitada por caixas de exclusão de pastoreio colocadas uma por cada quadrícula, em todos os cantos das quadrículas situados a Sudoeste. As amostras recolhidas foram tratadas no Laboratório de Pastagens e Tecnologia de Forragens da Universidade de Évora com vista à análise da produção de matéria seca.

Também no final do ciclo vegetativo de 2007 foi varrida a área da parcela por um medidor de condutividade eléctrica (“Dualem”) tendo incorporada uma antena GPS. Este equipamento tem um transmissor de um lado (bobina emissora) e um receptor do outro. Quando em contacto com a terra, o transmissor emite um sinal de corrente alterna que gera um campo electromagnético (campo magnético primário) que passa por baixo do solo e que varia com o tempo. Este campo induz pequenas correntes no solo que criam um campo magnético secundário, sendo detectado pelo receptor. A bobina receptora capta ambos os campos, sendo a relação entre eles função das diferentes condutividades do subsolo. A intensidade do sinal é, portanto, proporcional ao grau de condutividade do solo. Por exemplo, um solo com alta concentração de sais em solução apresenta maior condutividade que um solo não salino e esta diferença é detectada pelo sensor. Este medidor dual, permite registar dados de 2 camadas de solo numa só passagem, neste caso até 30 cm e até 80 cm de profundidade.

Esta medição é afectada por condições ambientais, especialmente a temperatura do ar, o que exige uma calibração frequente.

Atendendo à sensibilidade deste equipamento a estruturas metálicas, foi desenvolvido um veículo de 4 rodas, com uma lança de 3m, completamente construídos em PVC. Este

conjunto (figura 2) foi rebocado por um tractor e programado para registar medições segundo a segundo. Tendo por base as coordenadas geográficas das determinações, foram obtidos os valores médios da condutividade eléctrica registados em cada quadrícula.



Figura 1- Recolha de amostras georreferenciadas com GPS RTK.



Figura 2- Medição da condutividade eléctrica com o sensor “DUALEM”.

Em termos de análise estatística, foram comparados os valores médios das características do solo e da produtividade da pastagem em cada ano e no conjunto dos 4 anos de recolha em cada local de amostragem (quadrícula), com os valores médios das medições de condutividade eléctrica realizadas em cada quadrícula, em cada uma das profundidades (30 e 80 cm).

Analisou-se a correlação entre as diferentes variáveis pelo método dos mínimos quadrados considerando também a existência ou não de multicolinearidade. As variáveis que não apresentaram multicolinearidade foram utilizadas no *software* GWR (Geographically Weighted Regression) para estabelecimento de regressões multivariadas ponderadas espacialmente. As superfícies criadas foram obtidas a partir de krigagem ordinária. Utilizou-se um nível de significância estatística $p < 0,05$.

Este método (GWR) é uma recente melhoria na regressão linear tradicional, onde é tida em conta a não-estacionaridade da relação entre as variáveis espaciais (Wang *et al.*, 2005), ou seja, em que os parâmetros a estimar das variáveis independentes sejam função da localização espacial. O método GWR permite estimar os parâmetros para cada ponto (x,y) da área considerada. Os dados que se encontram na vizinhança do ponto a estimar contribuem com um peso maior na estimativa dos parâmetros do ajustamento do que a informação mais distante (Zhang *et al.*, 2004). Estes parâmetros estimados podem ser analisados, em forma de mapa, recorrendo a um sistema de informação geográfica permitindo uma análise das variações locais dos parâmetros estimados assim como dos respectivos erros (Fotheringham *et al.* 2002; Jetz *et al.* 2005).

3. Resultados e discussão

As tabelas 1 a 4 resumem as características do solo e da pastagem em termos de amplitude, média e desvio padrão.

Tabela 1. Teores de macronutrientes do solo no campo experimental da Herdade da Revilheira na camada de 0 a 20cm de profundidade, em Maio de 2004, de 2005, de 2006, de 2007 e na média dos 4 anos.

Parâmetros	P ₂ O ₅ (ppm)					NO ₃ (ppm)					K ₂ O (ppm)				
	2004	2005	2006	2007	Méd	2004	2005	2006	2007	Méd	2004	2005	2006	2007	Méd
Mínimo	14	16	22	20	22	2	1	0	1	5	56	62	56	40	58
Média	33	42	61	53	47	10	18	32	4	16	94	97	91	77	90
Máximo	92	152	490	394	262	31	171	89	10	55	244	150	370	352	271
Desvio Padrão	12	23	55	43	28	7	20	25	2	7	25	16	38	37	25

Tabela 2. Teores de matéria orgânica, argila e pH do solo no campo experimental da Herdade da Revilheira na camada de 0 a 20 cm de profundidade, em Maio de 2004, de 2005, de 2006, de 2007 e na média dos 4 anos.

Parâmetros	Matéria Orgânica (%)					Argila (%)					pH (H ₂ O)				
	2004	2005	2006	2007	Méd	2004	2005	2006	2007	Méd	2004	2005	2006	2007	Méd
Mínimo	1,1	0,8	1,3	0,8	1,3	21	17	23	23	23	5,68	5,56	5,49	5,40	5,58
Média	1,7	1,5	1,7	1,5	1,6	34	34	36	35	34	6,19	6,13	6,12	6,12	6,14

Máximo	2,4	2,2	3,3	3,8	2,7	46	49	49	43	43	7,38	7,15	8,02	7,50	7,28
Desvio Padrão	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	6	7	6	5	5	0,34	0,28	0,43	0,41	0,34

Tabela 3. Características da pastagem no campo experimental da Herdade da Revilheira, em Maio de 2004, de 2005 de 2006, de 2007 e na média dos 4 anos.

Parâmetros	Matéria seca total (kg ha ⁻¹)				
	2004	2005	2006	2007	Méd
Mínimo	301	285	790	1861	1361
Média	1858	1395	2560	3532	2407
Máximo	7167	3947	7893	6191	5678
Desvio Padrão	1045	1014	1491	941	825

Tabela 4. Valores de condutividade eléctrica do solo no campo experimental da Herdade da Revilheira, em Dezembro de 2008, a duas profundidades, 30 e 80 cm.

Parâmetros	Condutividade eléctrica (S m ⁻¹)	
	30 cm	80cm
Mínimo	74	30
Média	78	57
Máximo	86	73
Desvio Padrão	2	6

A análise destes resultados permitiram o apoio à tomada de decisão no que confere à elaboração de mapas de aplicação diferenciada de fertilizantes no Outono de cada ano (2004, 2005, 2006 e 2007), tendo constituído o corpo principal de uma comunicação oral apresentada (Serrano *et al.*, 2008).

O estabelecimento de regressões com o *software* GWR entre a condutividade eléctrica do solo a duas profundidades (30 e 80 cm) e as características físicas e químicas do solo e a produtividade da pastagem apenas mostrou coeficientes de determinação (R^2) aceitáveis para o pH e para a produtividade da pastagem, quando correlacionados com a condutividade eléctrica (respectivamente, 0,59 para o pH e 0,47 para a produtividade da pastagem, em termos de matéria seca). Um dos aspectos que se pode referir e que poderá ter condicionado a fraca correlação entre as restantes características físicas e químicas do solo e a condutividade eléctrica aparente do mesmo prende-se com as diferentes profundidades utilizadas. Enquanto as amostras de solo foram recolhidas até uma profundidade de 20 cm, a sonda de condutividade eléctrica tem um campo de acção até 30 cm ou até 80 cm.

A figura 3 ilustra a distribuição espacial dos valores de pH, produção de matéria seca e condutividade eléctrica na camada de solo de 30 e de 80cm de profundidade, verificando-se uma tendência similar na distribuição destas variáveis na parcela de ensaio. A zona de

maior produtividade da pastagem, situada na zona baixa da parcela, por onde passa uma linha de água, facto comprovado por Silva, *et al.* (2008) e, consequentemente, onde os teores de humidade do solo são mais elevados, corresponde também a valores mais elevados tanto da condutividade eléctrica como de pH. Estes resultados vêm de encontro aos resultados apresentados quer por Netto *et al.* (2007), que verificaram correlações significativas entre o pH e a condutividade eléctrica, quer por Klar (1988) que demonstrou o efeito do pH no desenvolvimento das culturas. Relativamente ao pH verifica-se uma amplitude entre 5,49 e 8,02, suficiente para afectar de forma diferenciada a disponibilização do fósforo no solo, macronutriente fundamental no desenvolvimento das pastagens tradicionais do Alentejo. Este é, inclusivamente, o principal nutriente fornecido nos planos de melhoramento das pastagens extensivas.

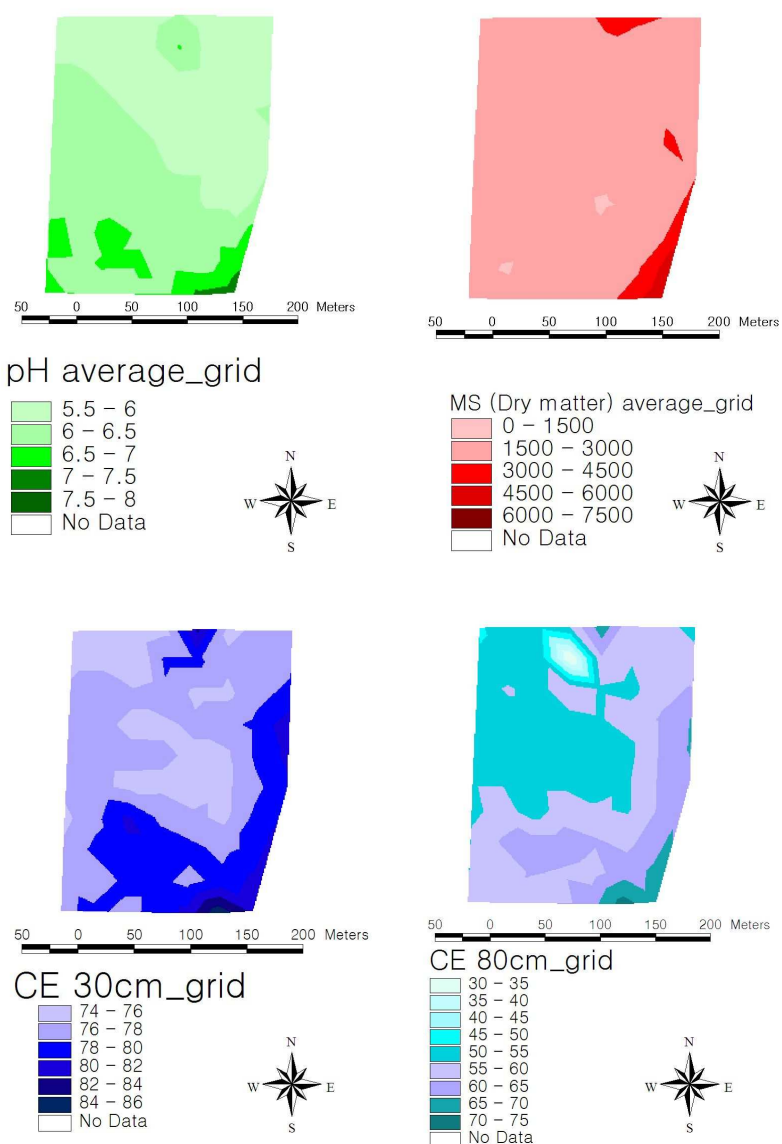


Figura 3. Mapas ilustrativos da distribuição do pH (em cima, à esquerda), da produção de matéria seca da pastagem (em cima, à direita) e da condutividade eléctrica (em baixo: a 30cm de profundidade, à esquerda; e a 80cm de profundidade, à direita) no campo de ensaio.

As figuras 4 e 5 permitem verificar, respectivamente, a elevada correlação entre os valores de pH estimados pelas equações de regressão obtidas a partir da medição expedita da condutividade eléctrica e os valores de pH observados e entre a produção de matéria seca estimada pelas equações de regressão obtidas a partir da medição expedita da condutividade eléctrica e a produção de matéria seca observada.

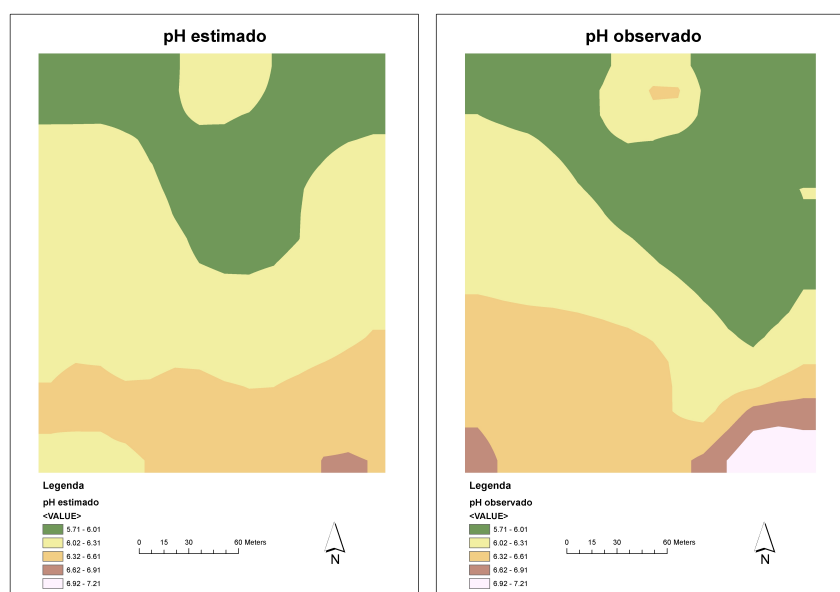


Figura 4. Mapas ilustrativos da distribuição de valores de pH: à esquerda, valores estimados pela equação de regressão estabelecida a partir da medição da condutividade eléctrica; à direita, valores observados.

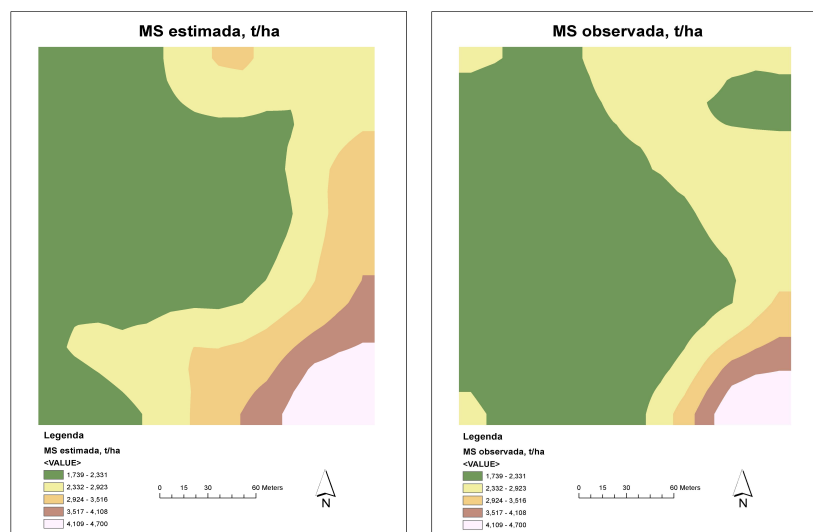


Figura 5. Mapas ilustrativos da distribuição de valores de produção de matéria seca: à esquerda, valores estimados pela equação de regressão estabelecida a partir da medição da condutividade eléctrica; à direita, valores observados.

4. Conclusões

Os coeficientes de determinação obtidos entre o pH do solo e a respectiva condutividade eléctrica (0,59) e entre a produção de matéria seca da pastagem e a condutividade eléctrica do solo (0,47) demonstram o potencial dos sensores de indução magnética para, em associação com o sistema GPS, permitirem um levantamento expedito das características do solo e da produtividade da pastagem. Ao contrário do que o estado do conhecimento revela, não se verificou uma correlação significativa da condutividade eléctrica aparente com outras características do solo, nomeadamente, o teor de argila, o teor de matéria orgânica ou os teores dos principais macronutrientes. Estas considerações deixam em aberto a necessidade de continuação de realização de estudos que permitam esclarecer a verdadeira relação entre estas variáveis.

Agradecimentos

Ao programa AGRO pelo financiamento do projecto 390, sem o qual não teria sido possível a concretização deste trabalho.

Referências bibliográficas

- Couto, E. G.; Veronese, M.; Scaramuzza, J. F.; Amorim, R. S. S. (2005). Comparação entre os métodos da cokrigagem e da krigagem para definir mapas de contorno de micronutrientes. *3º Simpósium Internacional de Agricultura de Precisão*, Embrapa Milho e Sorgo, 4 p.
- Dafonte, Jorge D. (2004). Sensores basados en la medida de la conductividad eléctrica para evaluar las propiedades del suelo y su aplicación en agricultura de precisión. *Proceedings of the II Jornadas sobre Agricultura de Precisión*, Universidad A Coruña, Espanha, 15-17 julio 2004, 56-63.

- Fotheringham, A. S.; Brunsdon, C.; Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships*. John Wiley & Sons Inc. England.
- Inamassu, R. Y.; Simões, M. S.; Júnior, A. L.; Rabello, L. M.; Molin, J. P. (2007). Local and global approaches to spatial data analysis in ecology. Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, S. Paulo, Brasil, *Circular Técnica*, 40: 97-98.
- Jetz, W.; Rahbek, C.; Lichstein, J.W. (2005). Local and global approaches to spatial data analysis in ecology. *Global Ecology Biogeography*, 14: 97-98.
- Klar, A.E. (1988). *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. 2ª ed., S. Paulo, Brasil, 408p..
- Marques da Silva, J. R.; Peça, J. O.; Serrano, J. M.; Carvalho, M. J.; Palma, P. M. (2008). Evaluation of Spatial and Temporal Variability of Pasture Based on Topography and the Quality of the Rainy Season. *Precision Agriculture* 9: 209-229.
- Netto, A. O. A.; Gomes, C. C. S.; Lins, C. C. V.; Barros, A. C.; Campeche, L. F. S. M.; Blanco, F. F. (2007). Características químicas e salino-sodicidade dos solos do perímetro irrigado Califórnia, SE, Brasil. *Ciência Rural, Santa Maria*, 37: 1640-1645.
- Proffitt, T.; Bramley, R.; Lamb, D.; Winter, E. (2006). Soil sensing in *Precision Viticulture- A new era in vineyard management and wine production*. Winetitle Ed., 51-55.
- Serrano, João, M. P. R; Peça, José O. Palma, Paulo; Carvalho, Mário; Silva, J. R. (2008). "Principales dificultades para la implementación de las tecnologías para la aplicación diferenciada de fertilizantes en pastizales" (Comunicação Oral). Proceedings do "IV Congreso Mundial de Ingenieros Agrónomos y Profesionales de la Agronomía, Madrid, 28 a 30 de Outubro de 2008, 4 p.
- Wang, Q.,; Ni, Jian; Tenhunen, J. (2005). Application of a geographically-weighted regression analysis net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, DOI: 10.1111/j.1466-822x.2005.00153.x.
- Zhang, L.; Bi, H.; Cheng, P.; Davis, C. J. (2004). Modeling spatial variation in tree diameter-height relationships. *Forest Ecology and Management*, 189: 317-329.